

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич

Должность: ректор

Дата подписания: 10.09.2025 13:56:52

Уникальный программный ключ:

9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf27819571e730d03774d16f3c0e576f0fc6

МИНОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИИ

Юго-Западный государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

И.о. заведующего кафедрой  
электроэнергетики и электротехники

  
И.В. Ворначева

«24» июня 2025г.

ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА  
для текущего контроля успеваемости  
и промежуточной аттестации  
обучаемых  
по дисциплине

Энергосберегающие технологии

(наименование дисциплины)

13.04.02 Энергетика и электротехника

(код и наименование ОПОП ВО)

## Раздел (тема) дисциплины **Тема 2. Сущность энергосбережения**

Лабораторная работа № 1. Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором как потребитель реактивной мощности:

1. Как определяется реактивная мощность, потребляемая АД?
2. Основные потребители реактивной мощности.
3. Значения отклонения напряжения по ГОСТ 13109-97.
4. Какие мероприятия следует использовать для сохранения питающего напряжения на АД в пределах, заданных ГОСТ 13109-97.
5. Как определить отклонение напряжения на АД расчетным путем.

Лабораторная работа №2. Синхронный электродвигатель как источник реактивной мощности.

1. Как определяется реактивная мощность, потребляемая или вырабатываемая СД?
2. Основные источники реактивной мощности.
3. Как регулируется реактивная мощность, вырабатываемая СД?
4. Достоинства и недостатки СД как источника реактивной мощности.

Лабораторная работа № 3. Исследование компенсации реактивной мощности:

1. Основные источники реактивной мощности в системах электроснабжения.
2. Основные потребители реактивной мощности в системах электроснабжения.
3. Баланс реактивной мощности и его составляющие.
4. Цели применения устройств компенсации реактивной мощности.

## Раздел (тема) дисциплины **Тема 7. Снижение потерь электроэнергии в электрических сетях**

Лабораторная работа № 4. Исследование распределения компенсирующих устройств:

1. Основные источники реактивной мощности в системах электроснабжения.
2. Основные потребители реактивной мощности в системах электроснабжения.
3. Баланс реактивной мощности и его составляющие.
4. Цели применения устройств компенсации реактивной мощности.

Лабораторная работа № 5. Исследование компенсации реактивной мощности в сети с несимметричными и нелинейными нагрузками:

1. Особенности компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения при наличии несимметричной нагрузки.
2. Особенности компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения при наличии нелинейной нагрузки.
3. Способы защиты конденсаторных батарей от токов высших гармоник.
4. Причины выхода из строя конденсаторных батарей при наличии нелинейной нагрузки.

Лабораторная работа №6. Исследование регулирования мощности компенсирующих устройств:

1. Особенности компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения при наличии больших изменений нагрузки.

2. Основные способы управления мощностью устройств компенсации реактивной мощности.
3. Схемные решения регулирования мощности конденсаторных батарей.
4. Способы регулирования реактивной мощности синхронных двигателей.

Лабораторная работа №7. Продольная и поперечная компенсация реактивной мощности:

1. Как объясняется понятие «компенсация реактивной мощности»?
2. Поясните принцип компенсации реактивной мощности с помощью векторной диаграммы (мощностей).
3. Конденсаторное устройство (КУ) пассивное, энергию не вырабатывает. Почему его рассматривают как источник или как генератор реактивной мощности?
4. Сравните назначение, принципы включения и следствия поперечной и продольной компенсации.
5. В чем заключается задача выбора мощности КУ в случаях поперечной и продольной компенсации?
6. Какие данные эксперимента показывают правильность расчета мощности КУ?
7. Поясните, почему, устанавливая в эксперименте заданную мощность компенсации, в режиме с поперечной компенсацией приходится регулировать и емкость КУ, и напряжение источника питания, тогда как в режиме с продольной компенсацией – только напряжение.
8. Почему целесообразно компенсирующие устройства устанавливать поближе к месту потребления?
9. Как изменятся потери активной и реактивной мощности и потеря напряжения в линии, если увеличить мощность КУ, установленного у потребителя?

### **Критерии оценки:**

- 1 балл выставляется обучающемуся, если 50% верных ответов
- 2 балла выставляется обучающемуся, если 80% верных ответов
- 3 балла выставляется обучающемуся, если 100% верных ответов

**Юго-Западный государственный университет**

**Кафедра Электроснабжения**

**Кейс задача**

по дисциплине Энергосберегающие технологии  
(наименование дисциплины)

Задания:

1. Расчёт поперечной ёмкостной компенсации реактивной мощности
2. Расчёт продольной ёмкостной компенсации реактивной мощности

### Краткие методические указания

Студенты делятся на группы по 2-3 человека. Каждая группа получает одно из заданий. Занятия проводятся в компьютерном классе. В начале проводится круглый стол по обсуждению теоретических предпосылок и методики решения задач. Затем задачи решаются индивидуально по группам под контролем преподавателя. За 30 минут до конца занятия проводится обсуждение полученных результатов.

### Теоретические предпосылки для задания 1

Основное назначение поперечной компенсации - повышение коэффициента мощности.

Размещение конденсаторов в основном принято выполнять по принципу наибольшего снижения потерь мощности в электрических сетях. Немаловажное значение при этом имеет повышение уровня напряжения, сопровождающее установку конденсаторов. В ряде случаев размещение конденсаторов может быть подчинено именно этому условию.

#### 4.2.1. Схема замещения и векторная диаграмма установки поперечной компенсации

Для расчетов и анализа поперечной компенсации как источника реактивной мощности рассмотрим цепь переменного тока с параллельным включением приемников электроэнергии и батареи конденсаторов (рис. 4.8а).

Для узла *A* схемы замещения ток в линии /<sub>ч</sub> определяется по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_л = \dot{I}_п + \dot{I}_{БК}, \quad (4.11)$$

где  $\dot{I}_л, \dot{I}_п, \dot{I}_{БК}$  - соответственно векторы тока в линии, в ветви нагрузки и в конденсаторной батарее.

Построение векторной диаграммы и сложение векторов тока по выражению (4.11) даны на рис. 4.8б. Векторная диаграмма построена для линии с нагрузкой в конце при наличии поперечной компенсации  $X_{БК}$  (активным сопротивлением батареи можно пренебречь). Из-за включения емкости параллельно нагрузке угол  $\varphi_1$  уменьшился до  $\varphi_2$ , ток нагрузки приемника - от  $I_1$  до  $I_2$ , то есть произошла разгрузка линии по току на величину  $\Delta I = I_1 - I_2$ . На эту же величину тока разгрузились и генераторы энергосистемы благодаря генерации конденсаторной батареей мощности  $Q_{БК}$  в месте установки электроприемников. Сеть и генераторы разгрузились и вследствие уменьшения потерь на  $\Delta P_k$  и  $\Delta Q_k$ , так как поток реактивной мощности снизился на  $Q_{БК}$ .

$$\Delta P_k = \left( \frac{Q_{БК}}{U} \right)^2 \cdot R; \quad \Delta Q_k = \left( \frac{Q_{БК}}{U} \right)^2 \cdot x, \quad (4.12)$$

где  $R$  и  $x$  - эквивалентные сопротивления цепи энергосистема - потребитель.

Для проектируемой сети снижение тока на  $D$  позволяет уменьшить сечение проводников линий на  $AF$ :

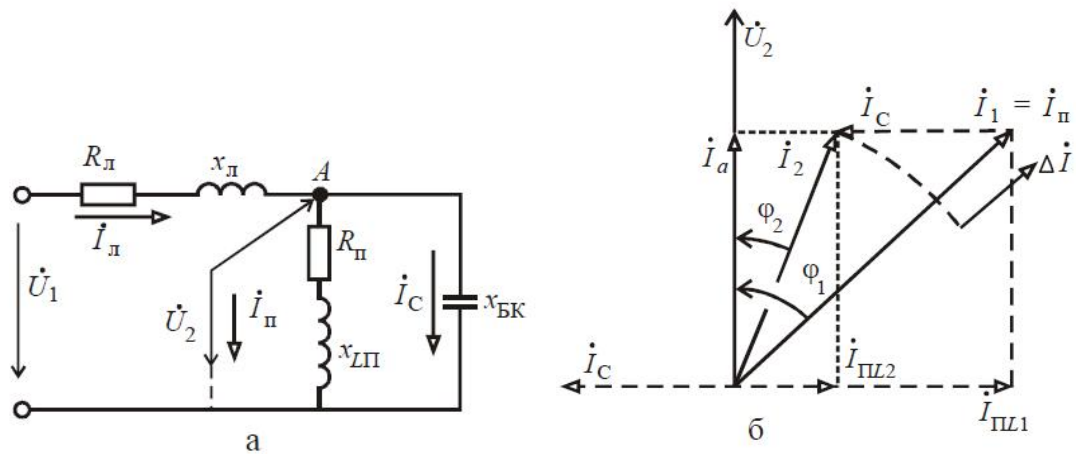


Рис.4.8 – Поперечная емкостная компенсация: а) схема замещения; б) векторная диаграмма цепи

$$\Delta F = \frac{\Delta I}{J_3}, \quad (4.13)$$

где  $J_3$  - экономическая плотность тока в линии.

Соответственно снижается установленная мощность трансформаторов. Уменьшаются потери напряжения в сети за счет уменьшения потока реактивной мощности на  $Q_{БК}$  до значения

$$\Delta U = \frac{PR + (Q - Q_{БК})x}{U}. \quad (4.14)$$

Из диаграммы (рис. 4.8б) видно, что если мощность БК слишком велика, ток  $I_{БК}$  будет больше индуктивной нагрузки потребителя  $I_C > I_{HL}$ . Тогда угол ( $\varphi_2 < 0$  и коэффициент мощности перейдет через значение  $\cos\varphi = 1$  в емкостный квадрант. Получается перекомпенсация: емкостный ток пойдет от потребителя к источнику, ток в линии  $I_{Л}$  будет увеличиваться по мере роста емкости. Отсюда следует, что повышение емкости и зависимых величин тока линии  $I_{Л}$  и  $\varphi_2$  целесообразно лишь в определенных пределах, не выходящих за значение  $\varphi_2 > 0$  и  $\cos\varphi < +1$ .

Из векторной диаграммы можно определить емкость  $C$  и реактивную мощность  $Q_{БК}$  конденсатора, необходимую для повышения коэффициента мощности  $\cos\varphi_1$  до значения  $\cos\varphi_2$ , превышающего естественное значение  $\cos\varphi_p$ , потребителя до включения поперечной компенсации. Из диаграммы находим:

$$I_C = I_{Л1} - I_{Л2} = I_a \operatorname{tg} \varphi_1 - I_a \operatorname{tg} \varphi_2 = I_a (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2).$$

Учитывая что,  $I_C = U/x_{БК} = U\omega C$  и  $I_a = P/U$ , получаем

$$U\omega C = \frac{P}{U} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2).$$

Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2); \\ Q_{БК} &= U^2 \omega C = P (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2). \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

Если нагрузка потребителя имеет емкостный характер, то для компенсации избыточной емкостной составляющей тока  $I_{СК}$  (для приближения коэффициента мощности к единице) применяется индуктивность, включаемая параллельно нагрузке. Такие случаи имеют место при наличии на предприятиях протяженных кабельных линий высокого напряжения в периоды сниженной нагрузки сети, а также при сохранении в работе всей мощности конденсаторов в часы минимума нагрузки предприятий.

Влияние поперечной компенсации сказывается не только на токовой нагрузке всех

элементов системы электроснабжения, но и на потере напряжения в сети, на соотношении напряжений в начале и в конце электропередачи.

На рис. 4.9 приведена векторная диаграмма напряжений в конце линии для двух случаев: при отсутствии поперечной компенсации (сплошными линиями) и при наличии компенсации, повышающей коэффициент мощности до  $\cos\varphi = 1$ . Диаграмма построена для постоянных значений напряжения в конце линии электропередачи  $U_2$  и активной мощности потребителя. Из диаграммы видно, что абсолютные величины напряжений  $U_1$  и  $U_2$  даже при значительном изменении угла  $\varphi$  (от  $\varphi$  до 0) за счет поперечной компенсации изменяются в ограниченных пределах и напряжение  $U_2$  остается меньше напряжения  $U_1$ .

Поперечная емкостная компенсация выполняется комплектами конденсаторными установками, которые устанавливаются в определенных местах схемы электроснабжения (см. раздел 4.2.3).

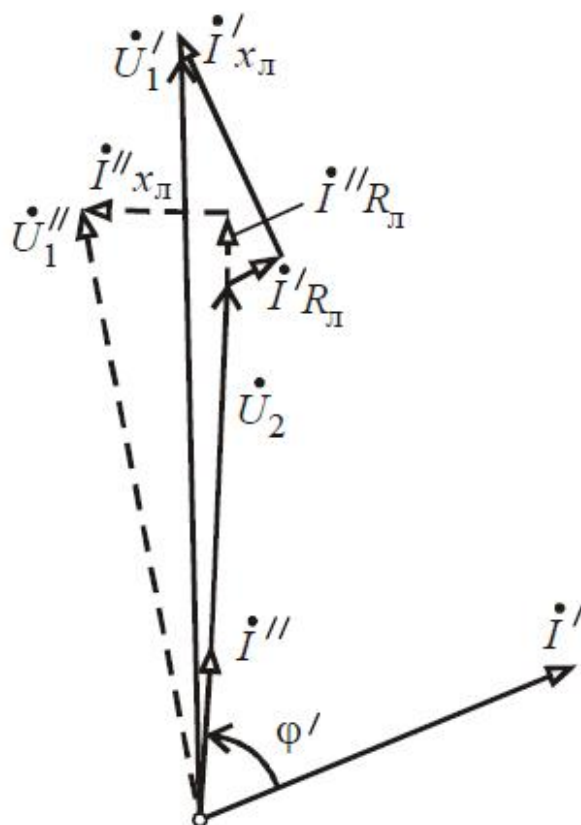


Рис.4.9 – Напряжение в начале и в конце линии при поперечной компенсации

Принципиальная схема конденсаторной установки приведена на рисунке 2.9 и 2.10, а схема включения в нагрузочную цепь на рис. 4.10.

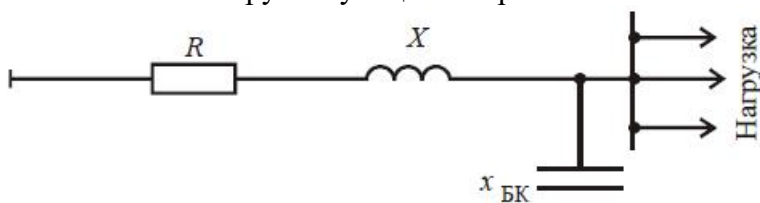


рис. 4.10 – Схема включения емкости в нагрузочную цепь при поперечной компенсации

Мощность однофазного конденсатора при синусоидальной форме напряжения, приложенного к его зажимам, определяется по соотношению:

$$Q = \omega \cdot C \cdot U^2. \quad (4.16)$$

Мощность трехфазного конденсатора, соединенного треугольником, определяется по этой же формуле. В этом случае  $U$  - линейное напряжение, а  $C$  - сумма емкостей всех трех

фаз конденсатора. Мощность трехфазного конденсатора, соединенного звездой, при равенстве емкостей всех трех фаз определяется по соотношению:

$$Q = \frac{1}{3} \cdot \omega \cdot C \cdot U^2, \quad (4.17)$$

где  $C$  – сумма емкостей всех трех фаз.

При принятых обозначениях коэффициент реактивной мощности до компенсации  $\operatorname{tg}\varphi_1 = Q/P$ , а после компенсации  $\operatorname{tg}\varphi_2 = (Q - Q_{\text{БК}})/P$ .

Так как  $\operatorname{tg}\varphi_2 > \operatorname{tg}\varphi_1$ , то  $\cos\varphi_2 > \cos\varphi_1$ .

До компенсации потери мощности в сети составляют

$$\Delta P_1 = 3 \cdot I^2 R = \frac{S^2}{U^2} \cdot R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R,$$

а после компенсации

$$\Delta P_2 = \frac{P^2 + (Q - Q_{\text{БК}})^2}{U^2} \cdot R.$$

Уменьшение потерь мощности после компенсации составит

$$\Delta P_1 - \Delta P_2 = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R - \frac{P^2 + (Q - Q_{\text{БК}})^2}{U^2} \cdot R = \frac{(2Q - Q_{\text{БК}}) \cdot Q_{\text{БК}}}{U^2} \cdot R$$

Полная нагрузка до компенсации  $S_1 = P/\cos\varphi_1$ , а после компенсации

$$S_2 = P/\cos\varphi_2, \quad \text{т.е.} \quad \frac{S_2}{S_1} = \frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2}.$$

Так как  $\cos\varphi_2 > \cos\varphi_1$ , то  $S_2 < S_1$ . Полная нагрузка после компенсации уменьшается обратно пропорционально значениям коэффициентов мощности после компенсации.

Таким образом, применение поперечной компенсации позволяет уменьшить потери мощности при сохранении величины передаваемой мощности или в пределах тех же потерь, увеличивая пропускную способность сети, повысить передаваемую мощность.

Потери напряжения в трехфазной линии могут быть определены по соотношению:

$$\Delta U_1 = \sqrt{3} \cdot I(R \cdot \cos\varphi + X \sin\varphi) \quad \text{или после преобразования}$$

- до компенсации

$$\Delta U_1 = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U}; \quad (4.18)$$

$$\Delta U_2 = \frac{P \cdot R + (Q - Q_{\text{БК}}) \cdot X}{U}, \quad (4.19)$$

- после компенсации

Уменьшение потери напряжения, а следовательно, увеличение напряжения на приемном конце с учетом соотношений (4.18) и (4.19) составит:

$$\Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} - \frac{P \cdot R + (Q - Q_{\text{БК}}) \cdot X}{U} = \frac{Q_{\text{БК}} \cdot X}{U}. \quad (4.20)$$

Изменение нагрузки у потребителя вызывает колебания напряжения в сети.

Потери напряжения при полной нагрузке до компенсации по соотношению (4.18) будут

$$\Delta U_1 = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U},$$

$$\Delta U_1' = \frac{k \cdot (P \cdot R + Q \cdot X)}{U},$$

а при неполной нагрузке

где  $k$  – коэффициент, учитывающий пропорциональное уменьшение нагрузки.

Уменьшение потери напряжения при неполной нагрузке:

$$\begin{aligned} \Delta U_1 - \Delta U'_1 &= \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} - \frac{k \cdot (P \cdot R + Q \cdot X)}{U} = \\ &= (1 - k) \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} = (1 - k) \cdot \Delta U_1 \end{aligned} \quad (4.21)$$

После компенсации потери напряжения при полной нагрузке по соотношению (4.19) составят

$$\Delta U_2 = \frac{P \cdot R + (Q - Q_{\text{БК}}) \cdot X}{U},$$

а при неполной нагрузке

$$\Delta U'_2 = \frac{kP \cdot R + (kQ - Q_{\text{БК}}) \cdot X}{U}.$$

Уменьшение потери напряжения при компенсации и неполной нагрузке

$$\begin{aligned} \Delta U_2 - \Delta U'_2 &= \frac{P \cdot R + (Q - Q_{\text{БК}}) \cdot X}{U} - \frac{kP \cdot R + (kQ - Q_{\text{БК}}) \cdot X}{U} = \\ &= \frac{P \cdot R + Q \cdot X - Q_{\text{БК}} \cdot X - kP \cdot R - kQ \cdot X + kQ_{\text{БК}} \cdot X}{U} = \\ &= \frac{P \cdot R + Q \cdot X - k(P \cdot R + Q \cdot X)}{U} = \frac{(1 - k)(P \cdot R + Q \cdot X)}{U} = (1 - k) \cdot \Delta U_1 \end{aligned} \quad (4.22)$$

Из соотношения (4.22) следует, что при уменьшении нагрузки колебания напряжения после компенсации будут такими же, как и до компенсации (см. соотношения (4.21)), но уровень напряжения будет выше. Это следует из соотношения (4.20), так как уменьшение потери напряжения зависит только от  $Q_{\text{БК}}$  и  $X$ , которые для электроустановки являются величинами постоянными.

**Таким образом, при поперечной компенсации уровень напряжения в сети повышается на постоянную величину в зависимости от мощности установленных конденсаторов и реактивного сопротивления элементов установки.**

### Задача для задания 1.

По высоковольтной линии напряжением 6 кВ, выполненной алюминиевыми проводниками  $3 \times 70 \text{ мм}^2$  (погонное активное сопротивление  $r_0 = 0,445 \text{ Ом/км}$ ) длиной 2 км, питается сосредоточенная в конце нагрузка, активная мощность которой 600 кВт, реактивная — 700 кВАр и полная - 920 кВА. С целью повышения  $\cos \varphi$  уменьшения потерь мощности и напряжения предполагается параллельно нагрузке подключить батарею конденсаторов мощностью 400 кВАр. Определить, как изменятся указанные параметры для:

- кабельной линии  $X_{\text{окб}} = 0,08 \text{ Ом/км}$ ;
- воздушной линии  $X_{\text{0 вл}} = 0,37 \text{ Ом/км}$ .

Решение:

Коэффициент мощности до установки конденсаторных батарей составляет:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P}{S_1} = \frac{600}{920} = 0,652,$$

а после их установки повысится до

$$\text{tg} \varphi_2 = \frac{Q_1 - Q_{\text{БК}}}{P} = \frac{700 - 400}{600} = 0,5 \text{ или } \cos \varphi_2 = 0,895.$$

После установки конденсаторных батарей по линии будет передаваться полная мощность:

$$S_2 = \frac{P}{\cos \varphi_2} = \frac{600}{0,895} = 670 \text{ кВА.}$$

Таким образом, полная нагрузка, а следовательно, и ток уменьшатся на

$$\frac{S_1 - S_2}{S_1} \cdot 100\% = \frac{920 - 670}{920} \cdot 100\% = 27,2\%.$$

Активное сопротивление линии равно

$$R = r_0 \cdot l = 0,445 \cdot 2 = 0,89 \text{ Ом.}$$

Потери мощности до компенсации составляют

$$\Delta P_1 = \frac{(P^2 + Q_1^2) \cdot R}{U^2} = \frac{(600^2 + 700^2) \cdot 0,89}{6^2} \cdot 10^{-3} = 21 \text{ кВт,}$$

а после установки конденсаторных батарей снизятся до

$$\Delta P_2 = \frac{P^2 + (Q_1 - Q_{\text{БК}})^2}{U^2} \cdot R = \frac{(600^2 + (700 - 400)^2) \cdot 0,89}{6^2} \cdot 10^{-3} = 11,1 \text{ кВт,}$$

т.е. уменьшатся на

$$\Delta P_1 - \Delta P_2 = 21 - 11,1 = 9,9 \text{ кВт}$$

или

$$\Delta P_1 - \Delta P_2 = \frac{(2Q_1 - Q_{\text{БК}}) \cdot Q_{\text{БК}}}{U^2} \cdot R = \frac{(2 \cdot 700 - 400) \cdot 400 \cdot 0,89}{6^2} \cdot 10^{-3} = 9,9 \text{ кВт.}$$

Таким образом, потери мощности уменьшились с 21 до 11,1 кВт, или на

$$\frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{\Delta P_1} \cdot 100\% = \frac{21 - 11,1}{21} \cdot 100\% = 47\%.$$

Кабельная линия. Индуктивное сопротивление линии равно:

$$X = x_{0\text{квл}} \cdot l = 0,08 \cdot 2 = 0,16 \text{ Ом.}$$

Потери напряжения до компенсации:

$$\Delta U_1 = \frac{P \cdot R + Q_1 \cdot X}{U} = \frac{600 \cdot 0,89 + 700 \cdot 0,16}{6} = 108 \text{ В,}$$

а после установления конденсаторных батарей

$$\Delta U_2 = \frac{P \cdot R + (Q_1 - Q_{\text{БК}}) \cdot X}{U} = \frac{600 \cdot 0,89 + (700 - 400) \cdot 0,16}{6} = 97 \text{ В.}$$

Уменьшение потерь напряжения составляет

$$\Delta U_1 - \Delta U_2 = 108 - 97 = 11 \text{ В}$$

или

$$\Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{Q_{\text{БК}} \cdot X}{U} = \frac{400 \cdot 0,16}{6} = 11 \text{ В.}$$

Потери напряжения уменьшились, а следовательно, уровень напряжения повысился на

$$\frac{\Delta U_1 - \Delta U_2}{U} \cdot 100\% = \frac{108 - 97}{6000} \cdot 100\% = 0,18\%.$$

Воздушная линия. Индуктивное сопротивление линии равно

$$X = x_{0\text{вл}} \cdot l = 0,37 \cdot 2 = 0,74 \text{ Ом.}$$

Потери напряжения

$$\Delta U_1 = \frac{P \cdot R + Q_1 \cdot X}{U} = \frac{600 \cdot 0,89 + 700 \cdot 0,74}{6} = 175 \text{ В;}$$

- до компенсации

$$\Delta U_2 = \frac{P \cdot R + (Q_1 - Q_{\text{БК}}) \cdot X}{U} = \frac{600 \cdot 0,89 + (700 - 400) \cdot 0,74}{6} = 126 \text{ В;}$$

- после компенсации

- уменьшение потерь  $\Delta U_1 - \Delta U_2 = 175 - 126 = 49 \text{ В}$  или

$$\Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{Q_{\text{БК}} \cdot X}{U} = \frac{400 \cdot 0,74}{6} = 49 \text{ В.}$$

Уровень напряжения повысился на

$$\frac{\Delta U_1 - \Delta U_2}{U} \cdot 100\% = \frac{175 - 126}{6000} \cdot 100\% = 0,81\%.$$

### Места установки компенсирующих устройств

На рис. 4.11 показана однолинейная схема сети предприятия с возможными местами установки компенсирующих устройств. Граница балансовой принадлежности может находиться в точках 1-4. Если компенсирующие устройства установлены на границе балансовой принадлежности, то потери активной энергии в сети потребителя не сокращаются, а пропускная способность сети не увеличивается.

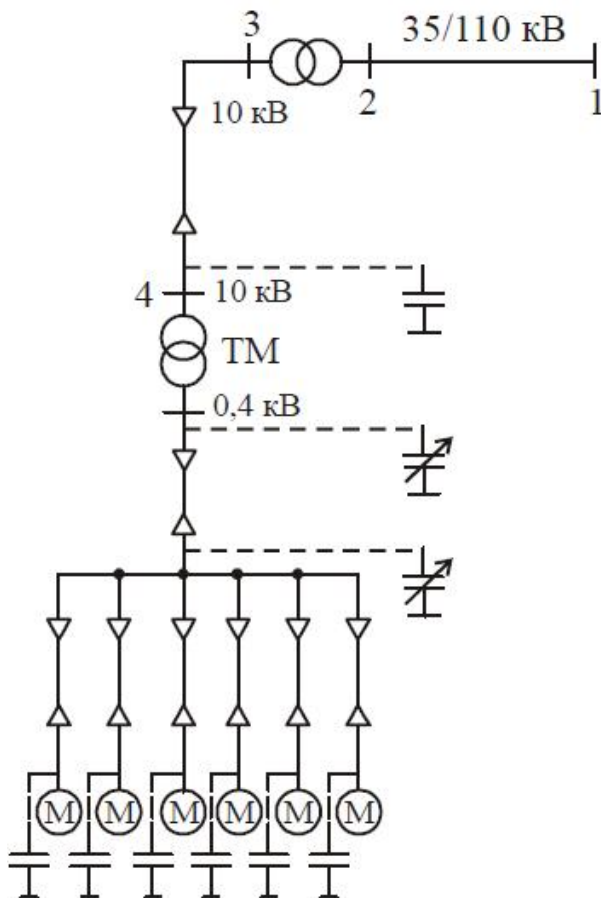


Рис. – Однолинейная схема сети предприятия

Единственный положительный эффект для него - частичная нормализация напряжения.

При переносе места установки компенсирующих устройств от границы балансовой принадлежности ближе к потребителю появляются участки сети, разгруженные от потоков реактивной мощности. На этих участках снижаются потери активной мощности. В результате снижается срок окупаемости компенсирующих устройств и повышается эффективность использования электроэнергии.

Потребителю целесообразно устанавливать компенсирующие устройства как можно дальше от границы балансового раздела.

Выбор места присоединения конденсаторных батарей опирается на анализ схемы электроснабжения. При этом рассматривается несколько способов компенсации реактивной мощности: централизованная, групповая, индивидуальная (рис. 4.12) и

комбинированная - централизованная в сочетании с групповой или индивидуальной. При большом количестве потребителей индивидуальная компенсация может оказаться менее эффективной, чем групповая. Индивидуальная компенсация целесообразна у крупных электроприемников с относительно низким коэффициентом мощности и большим числом часов работы в году. Групповая компенсация по сравнению с индивидуальной имеет немногим больший срок окупаемости, но благодаря применению установок с автоматическим регулированием реактивной мощности не требует ежедневного обслуживания (ручного включения и отключения) и является предпочтительным вариантом компенсации.

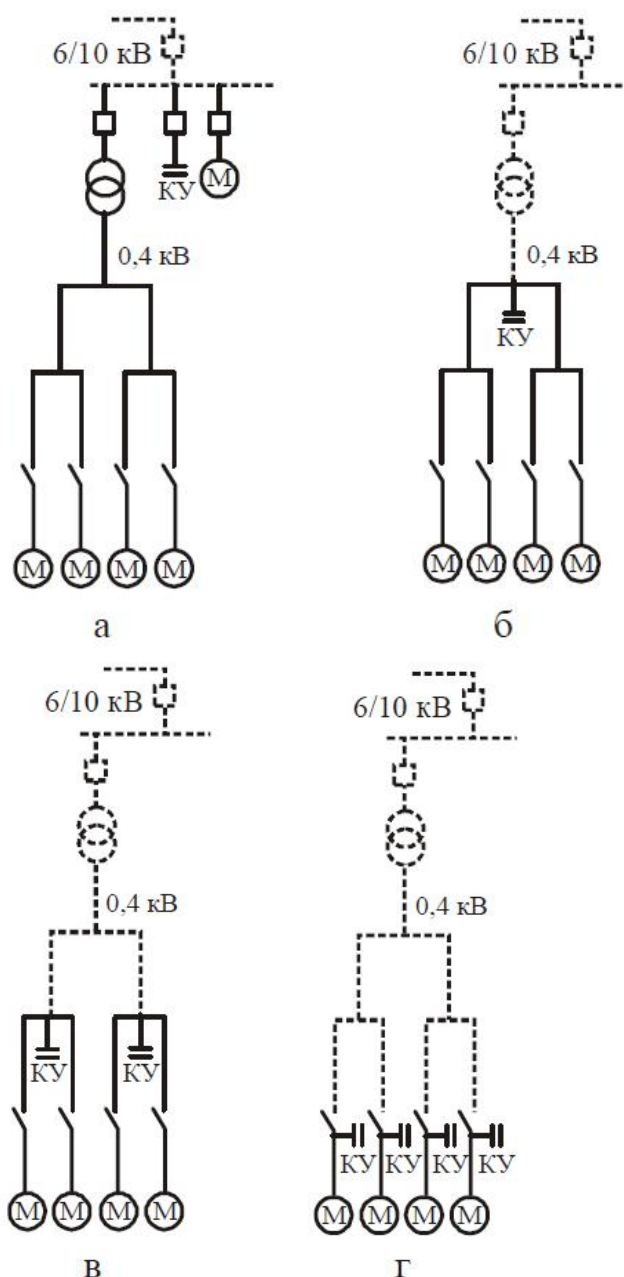


Рис. 4.12 – Способы компенсации реактивной мощности: а) централизованная на стороне высокого напряжения; б) централизованная на стороне низкого напряжения; в) групповая; г) индивидуальная; штриховой линией показаны участки сети, разгруженные от потоков реактивной мощности потребителей.

## Задание 2. Расчёт продольной емкостной компенсации реактивной мощности

### Теоретические предпосылки для задания 2

#### 4.3.1. Схема замещения и векторные диаграммы установки продольной компенсации

При продольной компенсации конденсаторы включаются в сеть последовательно.

Через них проходит полный ток линии.

Схема установки продольной компенсации (УПК) линии с указанием состава ее оборудования показана на рис. 4.13. Схема замещения УПК, в которой последовательно с сопротивлениями линии  $R$  и  $x_L$  включено емкостное сопротивление  $x_C$ , приведена на рис. 4.14а.

Действующие значения тока и напряжения на участках последовательной цепи определяются выражениями:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + x^2}}; \quad U_R = I \cdot R; \quad U_L = I \cdot x_L; \quad U_C = I \cdot x_C;$$

$$x = x_L + x_C; \quad x_L = \omega L; \quad x_C = 1/\omega C;$$

$$\varphi = \arctg \frac{x}{R}.$$

В зависимости от соотношения между индуктивным и емкостным сопротивлениями векторная диаграмма  $R, L, C$ - цепи имеет три вида:

- при индуктивном характере цепи, когда  $x_L > x_C$ , угол

$$\varphi = \arctg \frac{x_L - x_C}{R},$$

ток  $I$  отстает от напряжения  $U$  (рис. 4.14б):  **$R$**

- при емкостном характере цепи, когда  $x_L < x_C$ , угол  $\varphi < 0$ , ток  $I$  опережает напряжение  $U$  (рис. 4.14в);

- при равенстве  $x_L = x_C$ , угол  $\varphi = 0$ , ток  $I$  совпадает по фазе с напряжением  $U$ , а падения напряжения в индуктивности  $I x_L$  и в емкости  $I x_C$  равны и компенсируются, так как взаимно противоположны по направлению (рис. 4.14г).

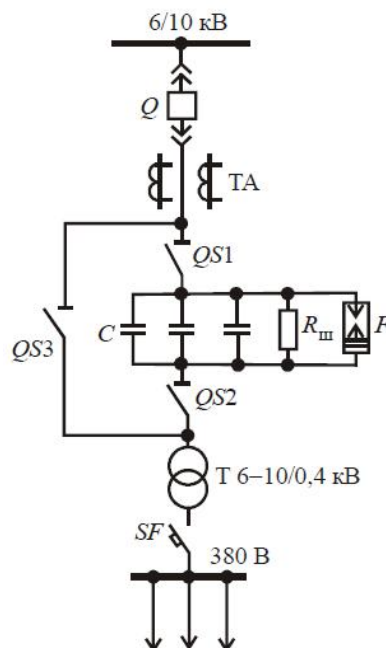


Рис.4.13 – Схема установки продольной емкостной компенсации

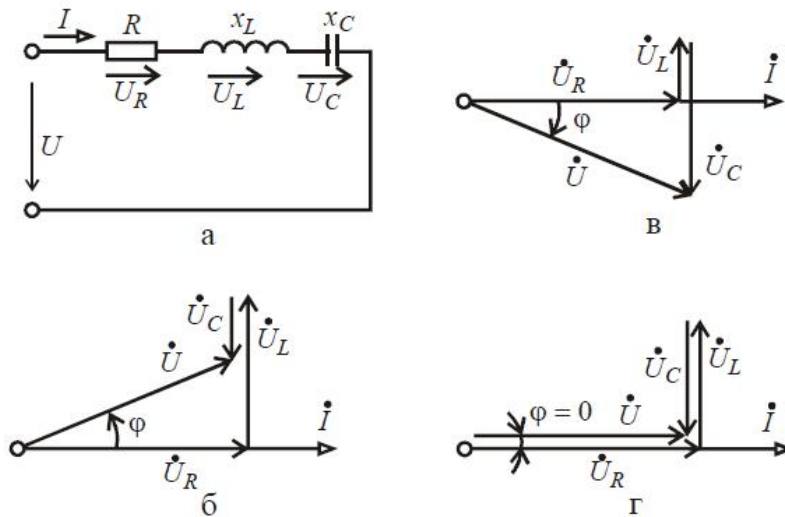


Рис.4.14 – Схема замещения и векторные диаграммы устройства продольной компенсации

Последний случай называется резонансом напряжений, характеризуется максимальным значением тока в цепи при  $U = \text{const}$ :

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{U}{R}. \quad (4.23)$$

В системах электроснабжения, где активное сопротивление невелико по сравнению с индуктивным сопротивлением трансформаторов, при резонансе напряжений в режиме короткого замыкания может быть очень большим ток КЗ и недопустимые повышения напряжения на индуктивности и емкости: при  $R \rightarrow 0$ ,  $l \rightarrow \infty$ ,  $U_L = U_C \rightarrow \infty$ .

Поэтому в установках продольной компенсации емкость выбирается из расчета, чтобы напряжение на конденсаторах  $U_C = I X_C$  составляло 5-20% номинального напряжения сети. При этом емкость УПК компенсирует лишь часть потерь реактивной мощности, равную  $Q_c = \omega C U^2_c$ ,

то есть УПК практически не является источником мощности.

Сопротивление  $R_{\text{ли}}$  (рис. 4.13), превышающее сопротивление конденсаторов примерно на порядок, ограничивает резонансные явления в установках продольной компенсации.

Главное назначение продольной компенсации - частичная компенсация индуктивного сопротивления участков электрической цепи для уменьшения потери напряжения в них. Влияние УПК на соотношение напряжений в начале  $U_1$  в конце  $U_2$  участка сети иллюстрирует векторная диаграмма на рис. 4.15.

При наличии в цепи только сопротивлений  $R_{\text{ли}}$  и  $x_L$  напряжение  $U_2$  в конце линии меньше напряжения  $U_1$  в ее начале на величину падений напряжения на активном  $I_2 \cdot R_{\text{ли}}$  и индуктивном  $I_2 \cdot x_L$  сопротивлении (сплошные линии на рис. 4.15б), при этом  $U_1 > U_2$ , ( $\varphi_1 > \varphi_2$ ). Если включить последовательно емкость  $x_C$ , то появится еще одна составляющая падения напряжения  $I_2 x_C$ . Ее направление на диаграмме противоположно индуктивной составляющей  $I_2 \cdot x_L$  (пунктирные линии на рис. 4.15б). Подбором  $x_C$  можно снизить разность напряжений  $U_1$  и  $U_2$ . Наиболее существенное влияние УПК оказывает на напряжения  $U_2$  при низком  $\cos \varphi_2$ .

Компенсация индуктивного сопротивления цепи емкостью приводит к повышению токов КЗ во всех элементах трансформаторной подстанции. Причем это особенно опасно для самих конденсаторов УПК, так как напряжение на них при сквозных токах короткого замыкания  $\Delta U_C = I_{\text{КЗ}} X_C$  возрастает пропорционально кратности тока КЗ ( $I_{\text{КЗ}} / I_{\text{НОМ}}$ ).

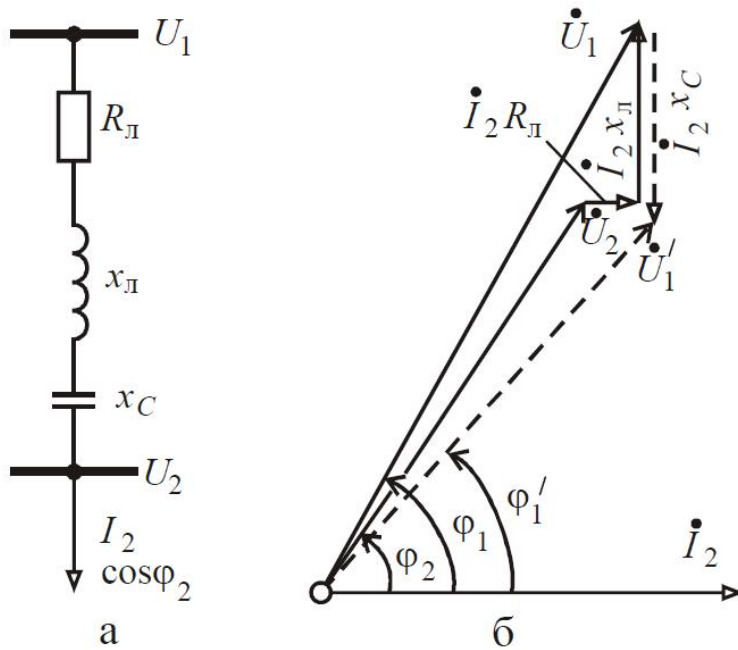


Рис. 4.15. Влияние продольной компенсации на соотношение напряжений в начале а е конце линии: а - схема включения емкости е нагрузочную цепь; б - векторная диаграмма

Для защиты конденсаторов путем их шунтирования при сквозных токах КЗ могут применяться, например, искровые спекающиеся разрядники (см. рис. 4.13), которые после срабатывания временно выводятся из работы с помощью разъединителей QS1, QS2 и QS3 для восстановления разрядных свойств.

Достоинством УПК является способность стабилизации напряжения при резкопеременной нагрузке. Если, например, при  $x_L = x_C$  ток  $I_2$  резко увеличится, то изменится лишь величина  $I_2 R_{л}$  (рис. 4.15), что несущественно при малом значении сопротивления  $R_{л}$ . Увеличение падения напряжения в индуктивности  $I_2 x_L$  компенсируется увеличением падения напряжения в емкости ( $-I_2 x_C$ ). Напряжение  $U_2$  при этом мало отличается от  $U_1'$ .

#### 4.3.2. Особенности продольной компенсации

Схема включения емкости в нагрузочную цепь при продольной компенсации приведена на рис. 4.15а.

Мощность конденсатора определяется по соотношению:

$$Q_k = \omega C U^2; \quad (4.24)$$

с другой стороны

$$Q_k = I_k \cdot U; \quad (4.25)$$

где  $I_k$  – ток, протекающий через конденсатор, из выражения (4.25)

$$U = \frac{Q_k}{I_k}; \quad (4.26)$$

Заменяя в формуле (4.24) значение  $U$  из выражения (4.26), получаем

$$Q_k = \omega C U^2 = \omega C \frac{Q_k^2}{I_k^2} = \frac{I_k^2}{\omega C}. \quad (4.27)$$

Так как при продольной компенсации ток конденсатора  $I_k$  равен проходящему через него току нагрузки линии  $I_2$  (рис.4.15а), то

$$Q_k = \frac{I_2^2}{\omega C}. \quad (4.28)$$

Таким образом, мощность конденсаторов при продольной компенсации является величиной переменной и зависит от изменяющегося во времени тока нагрузки линии.

До компенсации потери напряжения в трехфазной линии рассчитывается по выражению

$$\Delta U_1 = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U}, \quad (4.29)$$

а после компенсации

$$\Delta U_2 = \frac{P \cdot R + Q \cdot (X - X_{\text{БК}})}{U}. \quad (4.30)$$

Уменьшение потери напряжения составляет

$$\Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} - \frac{P \cdot R + Q \cdot (X - X_{\text{БК}})}{U} = \frac{Q \cdot X_{\text{БК}}}{U}. \quad (4.31)$$

Из выражения (4.31) следует, что уровень напряжения повышается не на постоянную величину, как при поперечной компенсации, а на величину, меняющуюся пропорционально изменению реактивной нагрузки линии (при неизменном значении  $X_{\text{БК}}$  для установленных конденсаторов).

Подбором мощности конденсаторов можно добиться равенства напряжения на питающем и приемном конце линии. Если в выражении (4.30) значение  $\Delta U_2$  принять равным нулю, то

$$P \cdot R + Q(X - X_{\text{БК}}) = 0 \text{ и } X_{\text{БК}} = \frac{P \cdot R}{Q} + X,$$

$$X_{\text{БК}} > X.$$

т.е.

Рассмотрим, как изменение нагрузки влияет на потери напряжения в сети.

До компенсации потери напряжения:

$$\Delta U_1 = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U};$$

- при полной нагрузке

$$\Delta U'_1 = \frac{\kappa \cdot (P \cdot R + Q \cdot X)}{U},$$

- при неполной нагрузке

где  $\kappa$  – коэффициент, учитывающий пропорциональное уменьшение нагрузки;

- уменьшение потери напряжения

$$\begin{aligned} \Delta U_1 - \Delta U'_1 &= \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} - \frac{\kappa \cdot (P \cdot R + Q \cdot X)}{U} = (1 - \kappa) \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} = \\ &= (1 - \kappa) \Delta U_1. \end{aligned}$$

Потери напряжения с учетом продольной компенсации:

$$\Delta U_2 = \frac{P \cdot R + Q \cdot (X - X_{\text{БК}})}{U};$$

- при полной нагрузке

$$\Delta U'_2 = \frac{\kappa \cdot (P \cdot R + Q \cdot (X - X_{\text{БК}}))}{U};$$

- при неполной нагрузке

уменьшение потери напряжения

$$\begin{aligned} \Delta U_2 - \Delta U'_2 &= \frac{P \cdot R + Q \cdot (X - X_{\text{БК}})}{U} - \frac{\kappa \cdot (P \cdot R + Q \cdot (X - X_{\text{БК}}))}{U} = \\ &= (1 - \kappa) \frac{P \cdot R + Q \cdot (X - X_{\text{БК}})}{U} = (1 - \kappa) \Delta U_2 \end{aligned}$$

так как  $\Delta U_2 < \Delta U_1$ , а  $(1 - \kappa)$  – величина постоянная для определенной степени

загрузки линии, то  $\Delta U_2 - \Delta U'_2 < \Delta U_1 - \Delta U'_1$ . (4.32)

Из выражения (4.32) следует, что при изменении нагрузки линии колебания напряжения в ней при наличии продольной компенсации будут меньше, чем при ее отсутствии.

Если подбором сопротивлений добиться равенства напряжения на питающем и приемном концах линии ( $\Delta U_2 = 0$ ), то при любом изменении нагрузки никакого изменения напряжения на приемном конце линии не будет - напряжение сохранится стабильным, так как в этом случае

$$\Delta U_2 - \Delta U_2' = (1 - k)\Delta U_2 = 0.$$

Степень устойчивости системы при всех прочих равных условиях обратно пропорциональна величине реактивного сопротивления системы. Так как при продольной компенсации уменьшается реактивное сопротивление линии, а следовательно, и системы, то устойчивость последней повышается. Продольная компенсация, которая наряду с повышением устойчивости системы повышает уровень и уменьшает колебания напряжения, может разрешить сложности, связанные с большой протяженностью линий электропередачи.

К недостаткам применения продольной компенсации относятся следующие:

- в схему системы вводится новый элемент (состоит из большого количества конденсаторов), который должен быть не менее надежен в эксплуатации, чем остальные элементы сооружения;
- условия работы конденсаторов для продольной компенсации более тяжелые, чем при поперечной компенсации: при возникновении короткого замыкания за конденсаторами напряжение на их зажимах повышается, это требует устройства их защиты, в частности, шунтирование конденсаторной батареи разрядниками.
- шунтирование установки продольной компенсации выводит ее из схемы в тот момент, когда в ней больше всего по условиям устойчивости нуждается система электроснабжения.

Ценным свойством продольной компенсации является стабилизация напряжения при резкопеременной нагрузке.

**Задача 2.1 Определить число и общую мощность батареи конденсаторов, включаемую в сеть последовательно и предназначенную для регулирования напряжения.**

В режиме максимальной нагрузки потерн напряжения в сети должны быть снижены на 50%.

Напряжение сети 3 кВ. Активное сопротивление сети  $R = 4$  Ом. Реактивное сопротивление сети  $X_L = 4$  Ом. Передаваемая по линии мощность  $P = 100$  кВт. Коэффициент мощности нагрузки равен 0.8.

напряжение 600 В, мощность 8.5 кВАр, емкость 75 мкФ. Решение.

Используя исходные данные и выражения (4.29) и (4.30). определяется необходимая емкость и реактивное сопротивление конденсаторов.

Потери напряжения до компенсации

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X_L}{U_{ном}} = \frac{100 \cdot 4 + 75 \cdot 4}{3},$$

где  $Q = P \cdot \operatorname{tg} \varphi = 100 \cdot 0,75 = 75$  кВАр.

Потери напряжения после компенсации

$$0,5 \cdot \Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot (X_L - X_C)}{U_{ном}}.$$

Подставляя в последнюю формулу численные значения, получим

$$0,5 \cdot \frac{100 \cdot 4 + 75 \cdot 4}{3} = \frac{100 \cdot 4 + 75(4 - X_C)}{3},$$

отсюда искомое емкостное сопротивление составит

$$X_C = \frac{350}{75} = 4,67 \text{ Ом.}$$

Необходимая емкость конденсаторной батареи для одной фазы может быть определена из выражения

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C},$$

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{10^6}{314 \cdot 4,67} = 682 \text{ мкФ.}$$

т.е.

Зная заданную емкость одного конденсатора  $C_0 = 75 \text{ мкФ}$ , рассчитывается нужное их число при параллельном соединении:

$$n = \frac{C}{C_0} = \frac{682}{75} = 9, \quad n_{\Sigma} = 3 \cdot n = 3 \cdot 9 = 27.$$

Рабочий ток одной фазы линии электропередачи

$$I_{\text{раб}} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 3 \cdot 0,8} = 24 \text{ А.}$$

Ток в каждой ветви конденсаторной батареи

$$I_C = \frac{I_{\text{раб}}}{n} = \frac{24}{9} = 2,67 \text{ А.}$$

Сопротивление каждого конденсатора

$$X_{C0} = \frac{1}{\omega C_0} = \frac{10^6}{314 \cdot 75} = 42,5 \text{ Ом,}$$

а напряжение на конденсаторах в рабочем режиме

$$U_C = I_C \cdot X_{C0} = 2,67 \cdot 42,5 = 113 \text{ В.}$$

Общая мощность батареи конденсаторов

$$Q_C = 3 \cdot I_{\text{раб}}^2 \cdot X_C = 3 \cdot 24^2 \cdot 4,67 \cdot 10^{-3} = 8,05 \text{ кВАр.}$$

Из расчетов следует, что нет необходимости устанавливать для целей компенсации индуктивного сопротивления конденсаторы, рассчитанные на рабочее напряжения сети, так как напряжение между их обкладками определяется не рабочим напряжением сети, а произведением тока на сопротивление. В том случае, если в рассечку линии, например, 10 кВ включаются конденсаторы на более низкое напряжение, вся батарея должна быть надежно изолирована от земли.

Если в рассмотренном примере 4.4 учесть возможность аварии в сети с появлением тока короткого замыкания двух- и трехкратной величины, то напряжение на конденсаторах останется в пределах рабочего (см. условие примера). Конденсаторные батареи при продольной компенсации должны рассчитываться на передаваемую по линии мощность.

**Задача 2.2** Рассчитать необходимую мощность батареи конденсаторов для продольной компенсации (принять однофазные конденсаторы КПМ-0.6-50-1), чтобы потери напряжения при полной нагрузке в конце линии после компенсации составляли  $\Delta U_2 = 0,5 \text{ кВ}$ .

Воздушная линия длиной 24 км имеет активное сопротивление 7.44 Ом. а реактивное 9.6 Ом. Передаваемая по данной линии активная мощность составляет 10000 кВт. реактивная - 9000 кВАр и полная - 13450 кВА. нагрузка сосредоточена в конце линии.

Напряжение в начале линии  $U_a = 36$  кВ, а в конце линии до компенсации  $u_b = 31,5$  кВ. Результат сравнить с мощностью батареи конденсаторов в случае реализации поперечной компенсации.

Потери напряжения в линии до компенсации

$$\Delta U_1 = U_a - U_b = 36 - 31,5 = 4,5 \text{ кВ.}$$

Заданное уменьшение потери напряжения

$$\Delta U_1 - \Delta U_2 = 4,5 - 0,5 = 4 \text{ кВ.}$$

$$\Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{Q \cdot X_{\text{БК}}}{U_a}$$

Из выражения (см. соотношение (4.31)) определяем  $X_{\text{БК}}$ .

$$X_{\text{БК}} = \frac{(\Delta U_1 - \Delta U_2) \cdot U_a}{Q} = \frac{4 \cdot 36}{9000} = 16 \text{ Ом.}$$

Технические данные однофазных конденсаторов КПМ-0,6-50-1 для продольной компенсации:

$Q_{\text{к1}} = 50$  кВАр – мощность одного конденсатора;

$U = 0,6$  кВ – рабочее напряжение;

$C = 442$  мкФ – емкость одного конденсатора;

$$I_{\text{к1}} = \frac{Q_{\text{к1}}}{U} = \frac{50}{0,6} = 83 \text{ А;}$$

$$X_{\text{к1}} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 442 \cdot 10^{-6}} = 7,2 \text{ Ом}$$

Определим необходимое количество параллельно включенных конденсаторов на фазу:

$$n = \frac{I}{I_{\text{к1}}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_b \cdot I_{\text{к1}}} = \frac{13450}{\sqrt{3} \cdot 31,5 \cdot 83} = 2,97.$$

Принимаем  $n=3$ .

Вычислим необходимое количество последовательно включенных конденсаторов на фазу:

$$m = \frac{X_{\text{БК}}}{X_{\text{к1}}/n} = n \frac{X_{\text{БК}}}{X_{\text{к1}}} = 3 \frac{16}{7,2} = 6,67.$$

Принимаем  $m=7$ .

Общее количество конденсаторов на фазу

$$n \cdot m = 3 \cdot 7 = 21,$$

а всей батареи

$$3 \cdot n \cdot m = 3 \cdot 21 = 63.$$

Общая мощность

$$Q_{\text{БК}} = 3 \cdot n \cdot m \cdot Q_{\text{к1}} = 3 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 50 = 3150 \text{ кВАр.}$$

Общее емкостное сопротивление одной фазы будет:

$$X_{\text{БК}} = \frac{m \cdot X_{\text{к1}}}{n} = \frac{7 \cdot 7,2}{3} = 16,8 \text{ Ом}$$

вместо необходимых 16 Ом.

Проверим полученное значение уменьшения потери напряжения:

$$\Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{Q \cdot X_{\text{БК}}}{U_a} = \frac{9000 \cdot 16,8}{36} \cdot 10^{-3} = 4,2 \text{ кВ}$$

вместо заданных 4 кВ.

Большая мощность конденсаторов  $Q_{\text{БК}}=3150$ кВАр получилась в следствие достаточно

жестких условий по уменьшению потери напряжения и поддержанию напряжения на необходимом уровне.

Если принять мощность конденсаторной батареи  $Q_{БК} = 3nmQ_{к1} = 2250$  кВАр, то при  $n=3$

$$m = \frac{Q_{БК}}{3 \cdot n \cdot Q_{к1}} = \frac{2250}{3 \cdot 3 \cdot 50} = 5;$$

$$X'_{БК} = \frac{m \cdot X_{к1}}{n} = \frac{5 \cdot 7,2}{3} = 12 \text{ Ом};$$

$$\Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{Q \cdot X'_{БК}}{U_a} = \frac{9000 \cdot 12}{36} \cdot 10^{-3} = 3 \text{ кВ};$$

$$\Delta U_2 = \Delta U_1 - 3 = 4,5 - 3 = 1,5 \text{ кВ};$$

$$U_2 = U_a - \Delta U_2 = 36 - 1,5 = 34,5 \text{ кВ}.$$

Мощность батареи конденсаторов для поперечной компенсации определим из соотношения

$$\Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{Q_{БК} \cdot X}{U_a},$$

где  $X$  – реактивное сопротивление линии.

Мощность батареи составит

$$\Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{Q_{БК} \cdot X}{U_a},$$

Таким образом, при поперечной компенсации для условий, принятых в примере, потребуется мощность конденсаторов почти в 5 раз больше (1500/3150), чем при продольной компенсации.

Для поперечной компенсации, когда  $\Delta U_1 - \Delta U_2 = 3$  кВ, потребуется конденсаторная батарея мощностью

$$Q'_{БК} = \frac{(\Delta U_1 - \Delta U_2) \cdot U_a}{X} = \frac{3 \cdot 36}{9,6 \cdot 10^{-3}} = 11250 \text{ кВАр}.$$

В таблице 4.2 для различной загрузки линии приведены колебания напряжения:

- 1 – до компенсации  $\Delta U_1 = U_a - U_b = 4,5$  кВ;
- 2 – с продольной компенсацией  $\Delta U_1 - \Delta U_2 = 4,2$  кВ;
- 3 – с продольной компенсацией  $\Delta U_1 - \Delta U_2 = 3$  кВ;

Таблица 4.2

Потери напряжения до и после продольной компенсации (к примеру 4.5)

№ п/п	Мощность конденсаторной батареи продольной компенсации, кВАр	Наименование величин	Потери напряжения, кВ, при загрузке линии, %			
			100	75	50	25
1	Без компенсации	$\Delta U_1 = U_a - U_b$	4,5	3,38	2,25	1,13
2	3150	$\Delta U_1 - \Delta U_2$ $\Delta U_2$	4,2 0,5	3,15 0,23	2,1 0,15	1,05 0,08
3	2250	$\Delta U_1 - \Delta U_2$ $\Delta U_2$	3,0 1,5	2,25 1,13	1,5 0,75	0,75 0,38

Т.О. колебания напряжения при продольной компенсации будут меньше, чем без компенсации, и зависят от степени компенсации.

### Критерии оценки:

- 6 баллов выставляется обучающемуся, если задание выполнено с помощью преподавателя;
- 10 баллов выставляется обучающемуся, если задание выполнено самостоятельно, есть ошибки.
- 12 баллов выставляется обучающемуся, если задание выполнено самостоятельно, без ошибок.

Составитель \_\_\_\_\_ А.В. Филонович  
(подпись)

«    »

20 г.

**Юго-Западный государственный университет**

**Кафедра Электроснабжения**

**Промежуточная аттестация (зачет)**

**Варианты для бланкового тестирования**  
по дисциплине **Энергосберегающие технологии**  
(наименование дисциплины)













